

# 金属蓋を持つ俵型軽量高強度セラミックス耐圧容器

正 会 員 浅 川 賢 一\*  
 姫 野 栄 仁\*\*  
 大 久 保 直 幸\*\*

前 田 洋 作\*  
 吉 田 政 生\*\*

## Small and Strong Ceramic Pressure-tight Housing with Metal Caps

by Kenichi Asakawa, *Member* Yosaku Maeda  
 Hidehito Himeno Masao Yoshida  
 Naoyuki Okubo

**Key Words:** Ceramic, Watertight-housing, Deep sea, FEM

### 1. 緒 言

セラミックスは、金属と比較して高い圧縮強度を持つため、大水深用の軽量高強度耐圧容器の素材として有望である。特に、深海用水中ロボットでは、浮力材の必要量を低減するために、耐圧容器の比重を小さくすることが求められる。セラミックスを用いることにより、金属製耐圧容器に比較して、軽量の耐圧容器を作ることができる。しかし、セラミックスの引っ張り強度が圧縮強度の数分の一であることと脆性材料であることから、金属製耐圧容器の設計方法をそのままセラミックスに適用することができない。そのため、セラミックスは耐圧容器としてこれまで一部にしか利用されてこなかった。Fig. 1<sup>1)</sup> は代表的なセラミックスと金属の圧縮強度と引っ張り強度を比較した図である。

筆者らはセラミックス円筒と金属蓋をもつ耐圧容器の新しい設計方法を考案し、有限要素法解析と小型耐圧容器による水圧実験により、その設計方法を確認した。この耐圧容器は、従来の俵型セラミックス耐圧容器と比較して、簡素な構造を持つだけでなく、組立なども容易になる。以下にその概要を報告する。

### 2. 従来のセラミックス耐圧容器

セラミックスは脆性材料であるため、過大な応力集中が発生すると、そこから破壊が始まり、全体が壊れる。例えば、耐圧容器にはしばしば水中コネクタ用貫通孔を設ける必要があるが、その貫通孔周辺には応力集中が発生する。また、円筒容器と蓋の接触面にも応力集中が発生する。金属容器の場合は、局所的に応力集中が発生しても、降伏現象があるために、応力集中が分散し、破壊に至らない。そのため、セラミックス耐圧容器を設計する場合には、貫通孔周辺の形状や円筒と蓋の接触部の設計に注意を払い、過大な応力集中を避ける必要がある。

セラミックス耐圧容器の研究開発は、1960 年代に

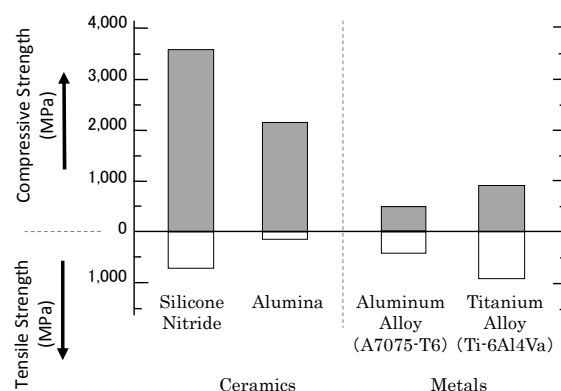


Fig. 1<sup>1)</sup> Comparison of tensile and compressive strength between ceramic materials and metals.

Stachiw<sup>2)</sup> によって開始された。その成果は、セラミックス浮力材<sup>3),4)</sup> や 11,000m 級の水中ロボット Nereus 用耐圧容器<sup>5)</sup> として活用されている。この Nereus 用耐圧容器では、円筒部分にセラミックスを用い、蓋には金属蓋またはセラミックス蓋を用いている。セラミックス円筒とセラミックス蓋は、一体として成形している。セラミックス円筒と金属蓋の間には、金属製のジョイントリングがセラミックス円筒側に固定されている。

一方筆者らは、これまでに水深 11,000m に対応可能な外径 446mm のセラミックス耐圧球<sup>6)</sup>を開発し、自己浮上式海底地震計<sup>1)</sup>に応用した。俵型耐圧容器に関しては、まず、セラミックス円筒とセラミックス半球蓋の間に接続リングを用いる方式<sup>7)</sup>を提案し、FEM 解析と小型耐圧容器による水圧試験により、その有効性を確認した。次に、セラミックス円筒とセラミックス半球蓋の接触部分の水圧による変形量を合わせる方式<sup>8)</sup>を提案し、その有効性を確認した。この方式では、接続リングを用いずに、セラミックス円筒と金属半球蓋を直接接続している。セラミックス円筒と金属半球蓋間の水密は、自己融着ゴムにより確保している。さらにセラミックス円筒と金属半球蓋間の滑りを考慮することにより、セラミックス円筒と金属蓋との接触面に生じる応力が低減し、半球蓋の構造を簡素化できることを示した<sup>9)</sup>。その構造と写真を Fig. 2<sup>9)</sup> と Fig. 3<sup>9)</sup> に示す。

\* 独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター

\*\* 京セラ株式会社

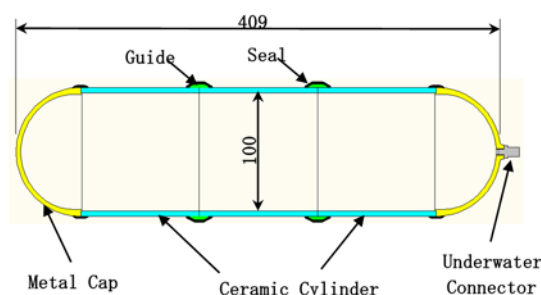


Fig. 2 Cross section view of the housing with elongated ceramic cylinder (unit: mm)



Fig. 3 Photo of a small-sized pressure-tight housing for hydraulic pressure tests with three jointed ceramic cylinders

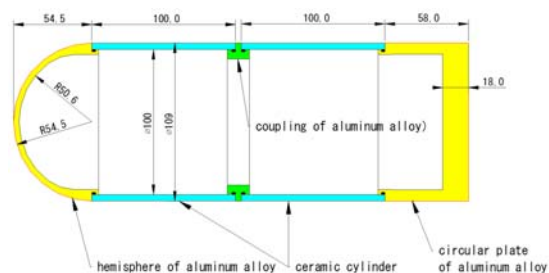


Fig. 4 Cross section view of the newly proposed ceramic housing with caps of metal hemisphere and metal circular plate (unit: mm)

上述の方式では、セラミックス円筒と金属半球蓋の間の水密は、自己融着ゴムにより確保している。この方法はガラス耐圧球でも利用されている方法で有り、信頼性も高い。しかし、そのハンドリングは最新の注意を要する。また、外側に自己融着ゴムを巻くため、凹凸が生じる。そこで、今回表面の凹凸をなくすと共に、組立などの取り扱いを容易にするために、Oリングを用いてセラミックス円筒と金属蓋を接続する方法を考案し、FEM解析と小型耐圧容器を用いた水圧試験により、その有効性を確認した。

### 3. 基本的構造と FEM 解析

#### 3.1 基本構造

今回提案する俵型セラミックス耐圧容器の基本構造を Fig. 4 に示す。セラミックスの成形品の大きさは、その製造設備に依存する。長尺のセラミックス円筒容器が必要な場合には、複数の円筒を接続する必要がある。そこで、今回のモデルでは2つのセラミックス円筒をアルミ合金製の接続リングで接続した。蓋には、アルミ合金製の半球とアルミ合金製の円板を用いた。接続部の水密は、Oリングを用いて確保している。円板蓋に水圧を加えると、中心部が凹になるように変形する。この円板蓋を直接セラ

Table 1 Mechanical properties of materials used in the FEM analyses

	A479	A7075-T6
Young's Modulus	360 GPa	71.6 GPa
Poisson Ratio	0.23	0.345
Density	3.8	2.8

ミックス円筒に接続すると、セラミックス円筒の接触部内側に高い圧縮応力が発生することが予想できる。そこで、円板蓋に円筒状の接続部分を設け、セラミックス円筒に発生する圧縮応力が平滑化するようにした。アルミ合金は A7075-T6 を用いた。アルミ合金とセラミックス円筒との間の摩擦係数を低減し、接触面に生じる応力を低減するために、アルミ合金の表面にはタフラム処理を施した。最大水圧は 60MPa とした。

セラミックス円筒の肉厚は、無限長円筒を仮定したときの座屈圧力が 60 MPa となるように設定した。半球蓋の厚みは、フープ応力の 1.1 倍が 0.2%耐力を上回らないように設定した。

今回のモデルでは、蓋と円筒の固定用ボルト等は削除した。固定用ボルトが必要な場合には、耐圧容器内部の構造体を利用して、蓋と内部構造体をボルト等で固定するなどの方法が考えられる。

#### 3.2 FEM 解析

小型モデルの製作に先だって FEM 解析を行った。解析は複数回行い、過大な応力集中が発生しない形状を求めた。最終的に選択した基本構造を Fig. 4 に示す。セラミックスとアルミ合金には、それぞれには A-479 (京セラ) と A7075-T6 を使用した。解析に使用した物性値を Table 1 に示す。また、セラミックスとアルミ合金間の摩擦係数は 0.072 とした。これは、予備的な実験により求めた値である。水圧は 60MPa である。

セラミックス円筒の端面に生じる最大主応力のコンターを、Fig. 5(a) と Fig. 5(b) に示す。いずれも、金属部分を取り除き、セラミックス部分だけを表示している。Fig. 5(a) は半球蓋側から見た図を、Fig. 5(b) は円板蓋側から見た図を示している。半球蓋との接触面に発生する最大主応力の極大値、円板蓋との接触面に発生する最大主応力の極大値、円筒内側に発生する最大主応力の極大値、接続リング(Coupling ring) との接触面に発生する最大主応力の極大値は、それぞれ 0.43MPa, 0.50MPa, -8.15MPa, 0.58MPa で、セラミックス耐圧容器の強度に与える影響は無視できる。

Fig. 6(a) と Fig. 6(b) は最小主応力のコンターで、Fig. 6(a) は半球蓋側から見た図を、Fig. 6(b) は円板蓋側から見た図を示している。いずれも、金属部分を取り除き、セラミックス部分だけを表示した物である。半球蓋との接触面に発生する最小主応力の極大値、円板蓋との接触面に発生する最小主応力の極大値、円筒内側に発生する最小主応力の極大値、接続リングとの接触面に発生する最小主応力の極大値は、それぞれ -868MPa, -736MPa, -760MPa, -750MPa である。これらの値は、A-479 一軸圧縮強度 2,160 MPa より十分小さい。

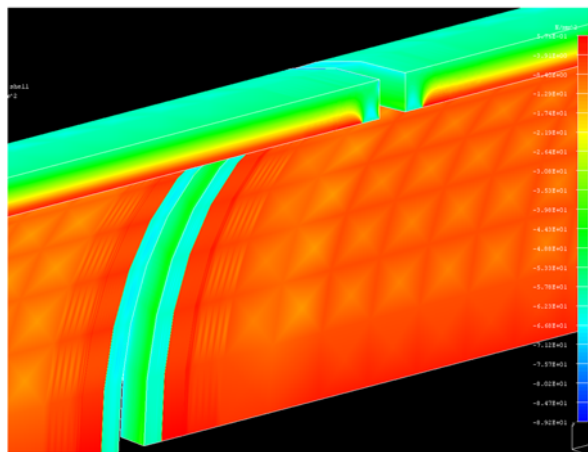
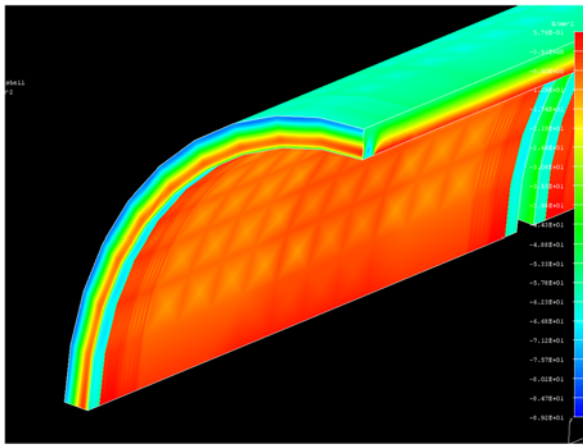


Fig. 5 (a) Contour of the major principal stress on the ceramic cylinder

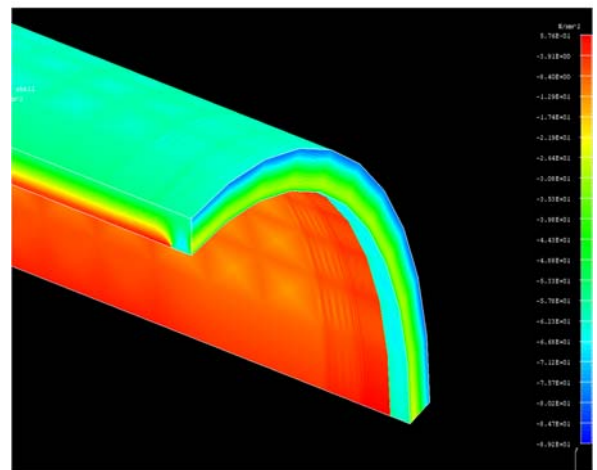
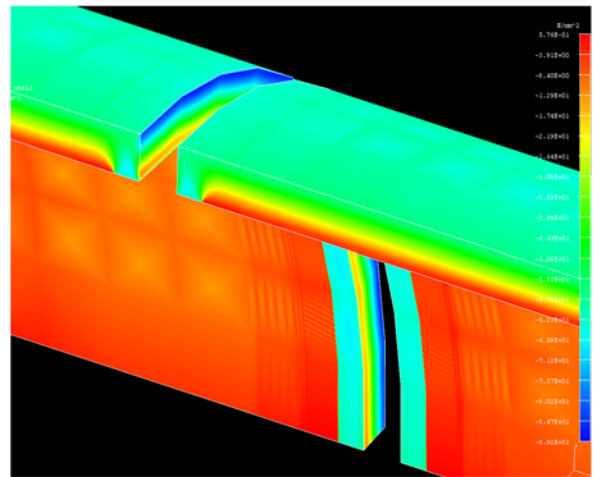


Fig. 5 (b) Contour of the major principal stress on the ceramic cylinder

#### 4. 小型耐圧容器を用いた水圧試験

FEM 解析結果を検証するために、小型耐圧容器を作製し、水圧を加えてその耐圧性能を確認した。その外観を Fig. 7 に示す。寸法は、Fig. 4 と同じである。

水圧試験は、繰り返し加圧試験と 6 時間の連続加圧試験を行った。繰り返し加圧試験では、最大圧力 60 MPa、昇圧/降圧速度 5 MPa/min、保持時間 0 min で 7 回の繰り返し加圧を行った。結果は良好で、深海用ガラス球に見られる接続部分の剥離やチッピングなどの現象は確認されなかった。また、タフラム処理の劣化も見られなかった。

#### 5. 結語

本論文では、金属蓋とセラミックス円筒から構成される耐圧容器の新しい設計方法を示し、FEM 解析と小型耐圧容器を用いた水圧試験により、その有効性を確認した。金属には、アルミ合金 A7075-T6 を使用し、セラミックス円筒との摩擦係数を低減し、接触面に生じる応力を低減するために、表面にタフラム処理を施した。金属蓋とセラミックス円筒間等の水密は、O リングにより確保した。O リングを利用することにより、組立などの扱いが容易になる。

FEM 解析により、発生する最大主応力と最小主応力は、それぞれ 3 点曲げ強度から推定される引っ張り強度と一軸圧縮強度より十分小さいことを確認した。さらに、小型耐圧容器を作製し、60 MPa の繰り返し加圧試験と 6 時間の連続加圧試験を行い、異常が見られないことを確認した。今後、さらに大型の容器を作製し、その耐圧性能を確認する予定である。

#### 参考文献

- 1) 浅川 賢一, 前田 洋作, 尾鼻 浩一郎, 渡邊 佳孝, 寺田 育正, 吉田 政生, 大久保 直幸, 福地 鐵雄: セラミックス耐圧球を用いた超深海型自己浮上式海底地震計の開発, 海洋調査技術, 印刷中。
- 2) J. D. Stachiw : Ceramic external pressure housings for deep sea vehicles, Proc. of OCEANS '06 MTS/IEEE Boston, 2006..
- 3) S. Weston et al. : Alumina Ceramic 3.6in Floatation Spheres for 11km ROV/AUV Systems, Proc. of OCEANS '05 MTS/IEEE Washington, 2005.
- 4) J. D. Stachiw, et al. : Alumina Ceramic 10in Floatation Spheres for Deep Submergence ROV/AUV Systems, Proc. of OCEANS 2005 MTS/IEEE Washington, 2005.
- 5) Glenn McDonald : Operations to 11,000m: Nereus Ceramic Housing Design and Analysis, Proc. of OCEANS'13 MTS/IEEE San Diego, 2013.
- 6) Asakawa, K., T. Hyakudome, M. Yoshida, N. Okubo, M. Ito and I. Terada: Ceramic Pressure-Tight Housings for Ocean-Bottom Seismometers Applicable to 11-km Water Depth, IEEE J. of Oceanic Eng. Vol. 37, No. 4, pp756-763, 2012.

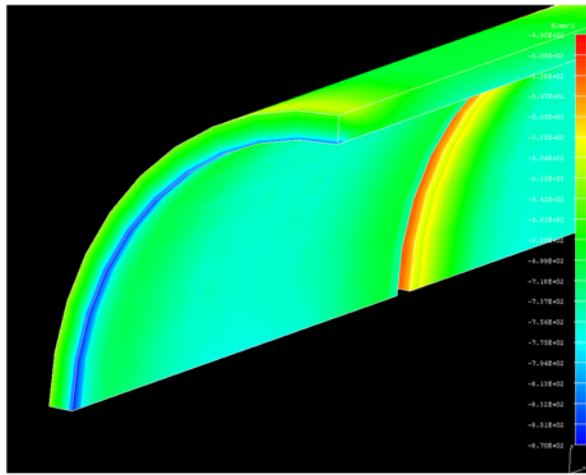


Fig. 6 (a) Contour of the minor principal stress on the ceramic cylinder

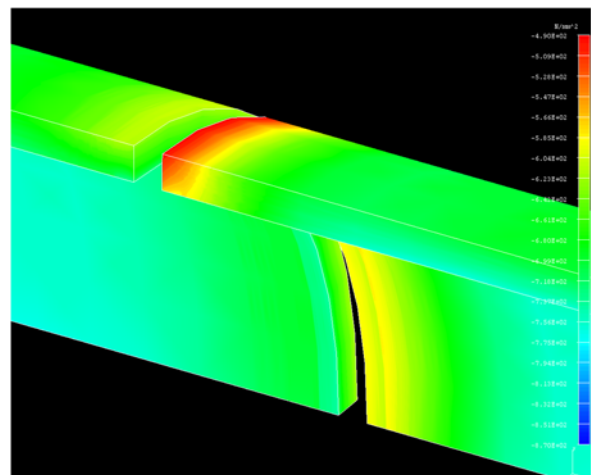


Fig. 6 (b) Contour of the minor principal stress on the ceramic cylinder

- 7) Kenichi Asakawa and Shinichi Takagawa : New Design Method of Ceramics Pressure Housings, proc. of OCEANS'09 IEEE Bremen, in CD-ROM, 2009.
- 8) Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome, Masao Yoshida, and Naoyuki Ookubo : FEM Analysis of Pressure-tight Ceramic Housings with Metal Caps, proc. of OCEANS 2012 Yeosu, 2012
- 9) Kenichi Asakawa, Yosaku Maeda, Tadahiro Hyakudome, Masao Yoshida and Naoyuki Okubo : Small-sized model for Pressure-tight Ceramic Housings with an Elongated Ceramic Cylinder, Proc. of OCEANS'13 MTS/IEEE Bergen, 2013.
- 10) Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome, Masao Yoshida and naoyuki okubo : Development of Small-sized Models of Low-cost Alumina Ceramic Pressure-tight Housings for Ocean-bottom Seismometers, proc. of Symposium on Underwater Technology 2011 & Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies 2011, 2011.

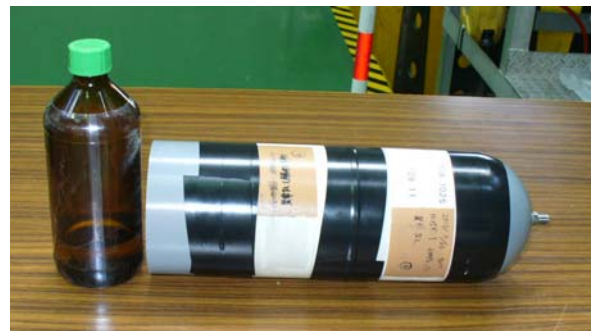


Fig. 7 Photo of the newly developed ceramics pressure-tight housing